

近距离多煤层开采覆岩叠加运动规律与破坏范围研究

李允生¹, 王凯^{1,4}, 崔海峰², 高海滨³, 黄万朋⁵, 杨铭锋⁵, 曹宏伟¹

(1. 肥城白庄煤矿有限公司, 山东 泰安 271000; 2. 济宁矿业集团有限公司, 山东 济宁 272000;

3. 山东新查庄矿业有限责任公司, 山东 泰安 271000; 4. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

5. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:肥城白庄煤矿7、8、9煤层的层间距较小,属于近距离煤层群,近距离煤层开采过程中受多次开采影响,覆岩运动具有叠加性和扰动性的典型特征。采用理论分析、数值模拟等方法,对近距离多煤层开采覆岩结构叠加运动规律、裂隙带叠加发育特征与综合形态进行了系统研究,并采用现场实测的方法对研究结果进行了验证。在近距离煤层下行开采后,上覆岩层呈现由“低位砌体梁式结构”,到“联合低位砌体梁结构+高位砌体梁式结构”,再演变为“联合低位悬臂梁结构+高位砌体梁式结构”,最终呈现“低位悬臂梁+高位砌体梁式结构”的演变过程。在近距离煤层群开采过程中,覆岩承载结构演变规律表现为:第二层开采后,第一层的导水裂隙带高度显著增加;而第三层开采后,第一层导水裂隙带高度变化不明显。

关键词:近距离煤层开采;覆岩叠加运动;数值模拟;现场实测;导水裂隙带

中图分类号:TD325

文献标志码:A

Study on overlying strata superimposition movement law and failure range of close-distance multiple coal seam mining

LI Yunsheng¹, WANG Kai^{1,4}, CUI Haifeng², GAO Haibin³,

HUANG Wanpeng⁵, YANG Mingfeng⁵, CAO Hongwei¹

(1. Feicheng Baizhuang Coal Mine Co., Ltd., Tai'an 271000, China; 2. Jining Mining Group Co., Ltd., Jining 272000, China;

3. Shandong Xinchazhuang Mining Co., Ltd., Tai'an 271000, China;

4. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

5. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Coal seams 7, 8, 9 in Feicheng Baizhuang Coal Mine, characterized by small spacing, belong to a typical close-distance coal seam group. Due to repeated extraction, the overlying strata movement exhibits the characteristics of superimposition and disturbance during the mining process. This study systematically investigates the superimposed movement patterns of overlying strata structures, the developmental characteristics of superimposed fracture zones, and their comprehensive morphology in close-distance multiple coal seam mining through theoretical analysis and numerical simulation. The findings are validated by field measurements. The results indicate that after downward mining of close-distance coal seams, the overlying strata structure evolves from a “low-position voussoir beam structure”, through a “combined low-position voussoir beam structure plus high-

收稿日期:2024-09-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51774195);煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室开放基金项目(2021-KFYB-020)

作者简介:李允生(1975—),男,山东枣庄人,高级工程师,主要从事煤矿安全生产及技术管理工作。E-mail:1103199441@qq.com

黄万朋(1985—),男,山东青岛人,教授,博士,主要从事矿山压力与岩层控制方向研究,本文通信作者。

E-mail:hwp20033@sdu.edu.cn

position voussoir beam structure” and a “combined low-position cantilever beam structure plus high-position voussoir beam structure”, to a “low-position cantilever beam plus high-position voussoir beam structure”. In the process of close-distance coal seam mining, the evolution of load-bearing structures in the overlying strata reveals that the height of the water-conducting fracture zone (WCFZ) in the first seam increases significantly after the second seam extraction, whereas it shows negligible variations after the third seam extraction.

Key words: close-distance coal seam mining; overlying strata superimposition movement; numerical simulation; field measurement; water-conducting fracture zone (WCFZ)

长期以来,国内外对于煤炭开采理论与技术方面的研究多聚焦于单一煤层,对近距离煤层群开采时相互影响规律研究和实践较为有限。目前,对于煤层群大多采用下行开采法^[1-5],上位煤层开采后,下位煤层的顶板将受到上位煤层的开采扰动影响与挤压破坏,若下位煤层的基本顶受到损伤破坏,其力学稳定性与同等地质赋存条件下的单一煤层开采不同^[6]。且上煤层开采应力集中对下煤层顶底板造成采动影响,下煤层二次采动时顶底板完整性破坏,进而导致上部煤岩应力与裂隙带范围的重新分布^[7-9]。近距离煤层群开采较单一煤层开采在覆岩运动规律方面具有明显的差异性。

关于煤层群开采后覆岩叠加运动规律与破坏范围的研究方面,黄庆享等^[10]通过对多个矿区浅埋深煤层群进行试验研究,提出了“短砌体梁”概念并构建了与“台阶岩梁”的联合力学结构模型。伍永平等^[11]通过对多个矿区大倾角煤层群的长壁工作面进行数值模拟与现场实测,总结了工作面开采围岩移动的规律性和复杂性。Majdi等^[12]和 Singh等^[13]通过对长壁工作面采场与卸压区高度的研究,阐明了煤层覆岩卸压区高度的形成机理,并得出卸压区高度与煤层高度的比值。魏世荣等^[14]以公乌素煤矿为工程对象,从理论和数值模拟的角度,得出导水裂隙带的分布在倾斜煤层回采过程中呈不对称“马鞍形”破坏特征等结论。Palchik^[15]通过研究长壁开采工作面中的瓦斯排放情况,得出联通裂隙带与煤层开采厚度成正比,水平独立裂隙带的形成是自下而上的阶梯式过程。李树刚等^[16]通过多种手段对煤层重复采动影响下的裂隙带分布、演化规律及覆岩裂隙形态进行研究,总结出裂隙经历的5个动态变化过程。

上述学者通过不同研究手段揭示了煤层群开采中覆岩结构的动态演变特征及裂隙发育规律,为近距离煤层开采提供了重要理论支撑。然而,现有研究多集中于特定埋深、倾角或地质条件下的单一现象解析,对于近距离煤层群重复采动引发的覆岩破坏叠加效应、裂隙带动态耦合机制等关键科学问题仍缺乏系统研究。特别是当煤层间距小于50 m时,上位煤层开采形成的“砌体梁”结构与下位煤层“台阶岩梁”之间的力学传递关系、裂隙带时空演化规律及其协同控制机制尚不明确,制约着近距离煤层安全高效开采技术的突破。本研究以肥城白庄煤矿近距离煤层下行开采为工程对象,采用理论分析、数值模拟结合现场实测的综合分析手段,研究近距离多煤层开采覆岩结构叠加运动规律,分析裂隙带叠加发育特征与综合形态,并通过现场实测对研究结论进行验证,为近距离煤层下行开采的覆岩稳定性控制、矿井水害防治等提供基础依据,保障矿井安全高效开采。

1 工程概况

肥城白庄煤矿9701工作面是97采区首采工作面,主采7煤层,煤层赋存标高-312.1~-410.7 m。98采区位于-430 m水平东翼,主采8、9煤层,共有4个工作面,其中首采工作面为9801工作面,工作面开采顺序为:9801、9803、9901和9903工作面。7、8、9煤层综合柱状图见图1。97与98采区工作面平面布置见图2。

7煤层厚1.3~1.5 m,平均1.4 m;倾角4°~10°,平均6°;7煤层下距8煤层15.73~32.50 m,平均间距31.6 m。8煤层厚度为1.9~2.2 m,平均为2.0 m;倾角4°~10°,平均7°;8煤层下距9煤层5.04~11.71 m,平均间距7.68 m。9煤层厚度1.0~1.5 m,平均1.4 m;倾角4°~10°,平均8°。

序号	岩石名称	柱状图	厚度/m	累计厚度/m	层间距/m	岩性描述
1	黏土岩		55.06	55.06	321.40	黄色,以砂质黏土、黏土质砂砾、含黏砾黏土、黏土砂层为主,上部为表土,下部含砂砾黏土和黏土层
2	其他覆岩		266.34	321.40		
3	中砂岩		4.23~8.51 7.78	329.18	7.78	灰绿色,泥质胶结,上部和下部有时为细砂岩与粉砂岩互层,厚度变化大
4	粉砂岩		3.76~4.68 4.04	333.22	15.70	深灰色,性脆,质细,分选极好,无层理,团块状构造
5	二灰		2.40~3.60 2.78	336.00		富含海百合茎及腕足类化石碎片,少量保存完好,上部多含泥质,裂隙发育
6	6煤		0.30~0.50 0.40	336.40		上部以亮煤为主,向下渐变为暗煤为主,镜煤呈线理状,不可采
7	黏土岩		0.10~0.30 0.15	336.55		团块状,根化石杂乱分布
8	细砂岩		4.90~7.80 6.30	342.85		灰色,成份以石英为主,次为暗色岩屑,具少量长石,泥质胶结,以缓波状层理为主,上部具波状层理,下部有水平层理
9	粉砂岩		6.00~9.70 8.85	351.70		深灰色,主要成分为石英,含大量菱铁矿结核及动物化石,性脆,易碎;灰白色,钙质胶结,以石英为主,次为暗色矿物,斜层理,坚硬,局部存在
10	7煤		1.30~1.50 1.40	353.10		黑色,主要可采煤层,玻璃光泽,煤层中上部有一层岩性为黏土岩的夹矸,平均0.15 m
11	泥质细砂岩		1.50~2.59 2.10	355.20	31.60	灰褐色,泥质胶结,分选好,具擦痕及灰黑色粉砂条带
12	细砂岩		7.40~9.16 9.0	364.20		灰绿色,成份以石英为主,次为暗色岩屑,具少量长石,泥质胶结,以缓波状层理为主,上部具波状层理,下部有水平层理
13	粉砂岩		4.90~8.80 8.51	372.03		深灰色,性脆,易碎,无层理,团块状构造,垂直裂隙发育,含方解石脉及菱铁矿结核
14	三灰		0.20~0.45 0.32	373.03		浅灰色,富含蜓科化石,坚硬,上部与粉砂岩层渐变接触
15	粉砂岩		4.30~6.46 5.67	378.70		深灰色,性脆,质细,分选极好,无层理,团块状构造,致密均一,愈近灰色处颗粒小,含瘤状黄铁矿结核
16	四灰		4.5~6.5 6.0	384.70		灰色,顶底部质不纯,性脆,质密,分选好,无层理,富含蜓类及植物化石,裂隙发育,普氏系数 $f=8.0$
17	8煤		1.90~2.20 2.00	386.70	2.00	黑色,煤层结构复杂,在煤层中上部有一层岩性为碳质粉砂岩的夹矸,平均0.2 m厚,上部坚硬,中下部较松散,易碎, $f=3\sim4$
18	黏土岩		0~0.20 0.10	386.80	7.68	浅灰色,含粉砂质,致密,无层理,富含植物根茎化石, $f=3\sim4$
19	粉砂岩		5.40~9.36 7.08	393.88		深灰色,致密,均一,向下颗粒渐变细, $f=3\sim4$
20	泥灰岩		0~1.80 0.50	394.38		灰褐色,内含密集的蜓科化石,局部存在
21	9煤		1.00~1.5 1.40	395.78	1.40	黑色,稳定可采煤层,中部含夹矸一层,断口平直,玻璃光泽,较松散
22	粉砂岩		0.60~2.3 1.5	397.28	1.50	深灰色,含泥质,性脆,致密均一,分选好,无层理,顶部含植物根部化石

图 1 煤层综合柱状图

Fig. 1 Column diagram of coal seams

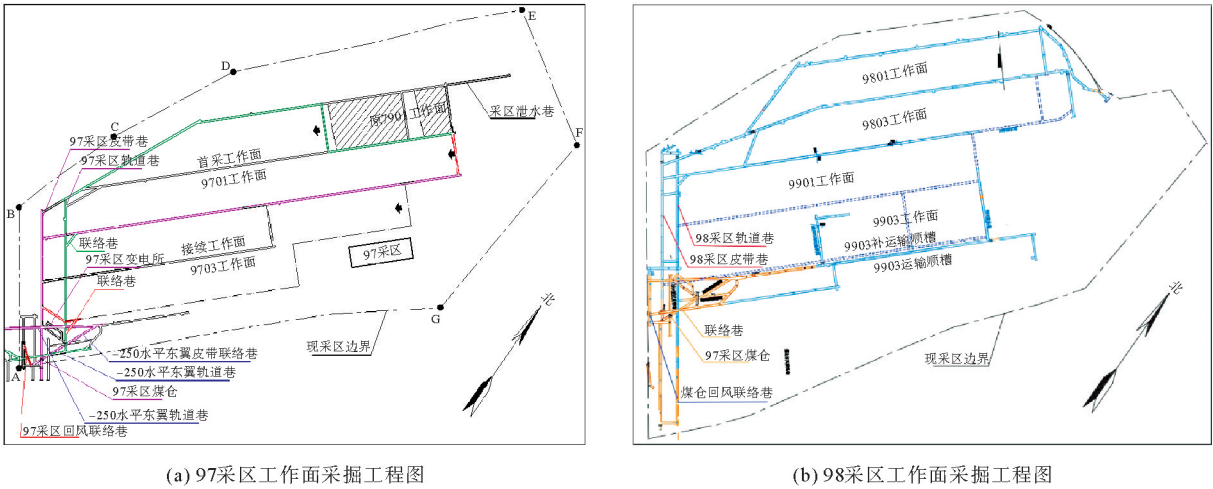


图 2 采区工作面采掘工程图

Fig. 2 Working face mining engineering plan of mining area

2 近距离多煤层开采覆岩叠加运动规律

2.1 数值模拟模型建立

为研究近距离多煤层开采覆岩叠加运动规律,以白庄煤矿 7、8、9 煤层工作面的工程地质条件为基础,使用通用离散元程序(universal distinct element code, UDEC)进行模拟计算,建立的数值模拟模型见图 3,模型尺寸为 400 m×200 m,煤岩体物理力学参数见表 1。本次数值模拟的推进距离设计为 200 m,单次开挖的距离为 20 m,并在 7、8、9 煤层的直接顶与基本顶布置若干条测线。如图 4 所示,7 煤直接顶与基本顶 7[#]、8[#] 测线,8 煤直接顶与基本顶 5[#]、6[#] 测线,9 煤直接顶 4[#] 测线。主要查看各煤层在推进 40、100、160、200 m 时的相关变化,并在开挖完成后进行平衡计算。

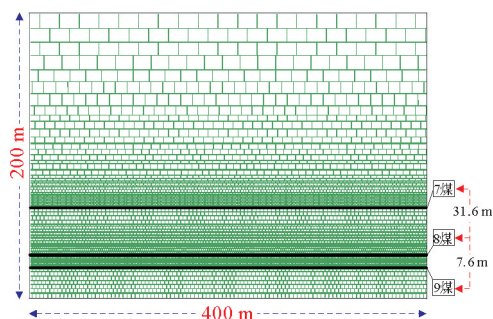


图 3 数值模拟模型

Fig. 3 Numerical simulation model

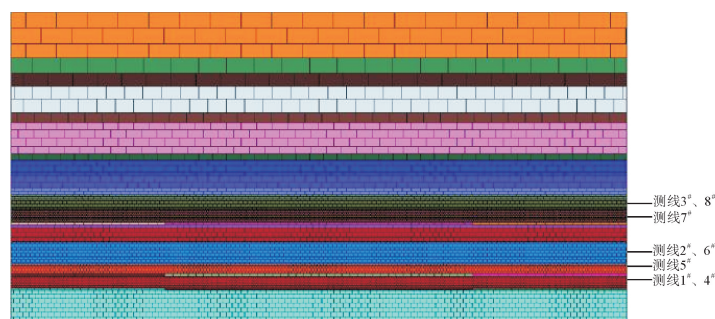


图 4 测线布置图

Fig. 4 Layout of survey lines

表 1 煤岩体物理力学性能参数表

Table 1 Physical and mechanical property parameters of coal and rock mass

岩性	抗压强度/MPa	密度/(kg/m ³)	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
泥灰岩	20.1	2 100	36	6.3	2.24	0.19
细砂岩	49.4	2 400	32	7.5	5.40	0.44
煤	13.7	1 300	30	1.2	1.44	0.13
泥质细砂岩	24.3	2 209	35	4.5	3.10	0.27
灰岩	42.6	2 600	41	9.3	4.50	0.32
粉砂岩	56.1	2 550	42	8.6	6.23	0.45
中砂岩	47.9	2 500	32	7.2	5.52	0.47
黏土岩	8.5	1 950	31	4.0	1.11	0.09

2.2 开挖步骤及测点布设方案

数值模拟模型采用与实际开采相同的下行开采顺序,即依次开采 7、8、9 煤层。考虑到煤层开挖处距离模型边界过近时会导致数据不准确等相关问题,在模型左右两侧各留设 100 m 的边界作为保护煤柱,以消除模型边界效应对模拟结果的影响。

通过研究后编制的 FISH 语言,在模型各岩层处布置测线,用以观测煤层群采后覆岩层和上煤层变形、移动和围岩应力变化情况。

2.3 近距离多煤层采后围岩下沉演化规律

当下行开采 7、8 煤层与 7、8、9 煤层时,工作面推进 100、160 及 200 m 时的垂直位移变化云图如图 5~6 所示。由图 5 和图 6 可知,随煤层推采距离的增加,覆岩在纵向上发生弯曲下沉,已推采部分中部覆岩下沉量最大,自中部区域向采空区两侧边界区域下沉量逐渐减小,垂直位移云图呈“正梯形”分布。

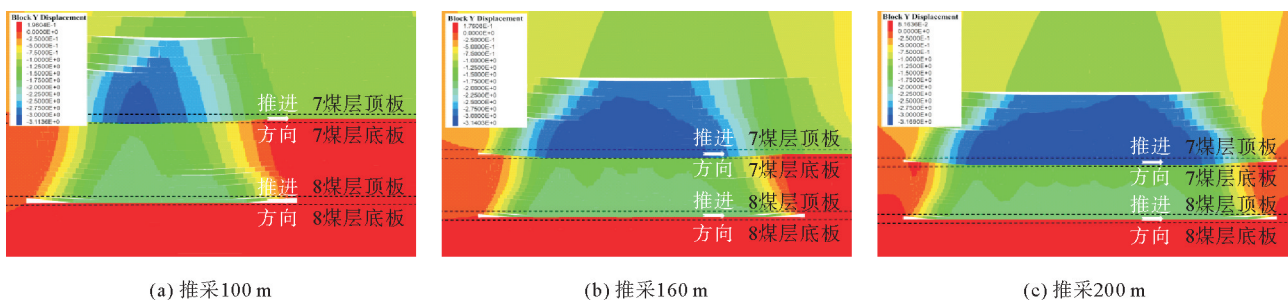


图5 下行开采7、8煤层垂直位移变化云图

Fig. 5 Cloud chart of vertical displacement changes in downward mining coal seams 7, 8

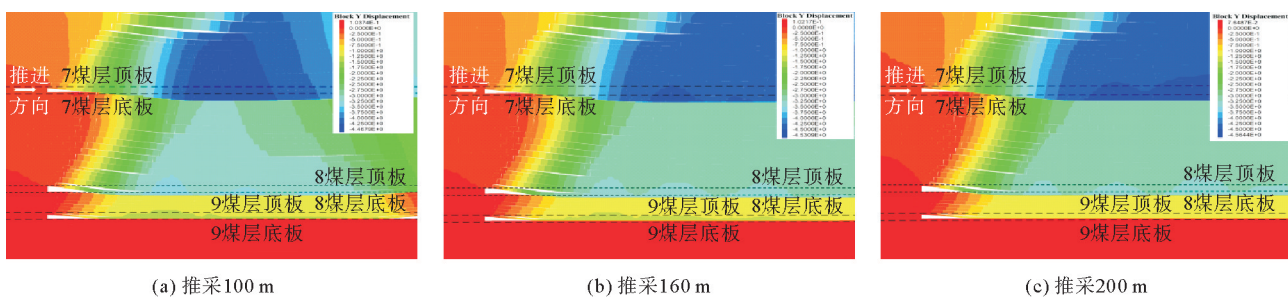


图6 下行开采7、8、9煤层垂直位移变化云图

Fig. 6 Cloud chart of vertical displacement changes in downward mining coal seams 7, 8, 9

下行开采7、8煤层,工作面推进100 m时,7煤层上覆岩层下沉量约为3.1 m,当推采至终采线时该值基本保持不变;下行开采7、8、9煤层,当工作面推进至40 m时,9煤层上覆岩层下沉量约为1.3 m,推采结束后,7煤层与8煤层覆岩最大下沉量约为4.5与3.3 m。通过数据分析可知,9煤层的采掘活动会对7、8煤层产生扰动影响。当下位9煤层开采时,由于9煤层与8煤层的层间距较小,煤层开采带来重复扰动,未充分垮落的岩体受到进一步的垮落作用,整体位移增加。7、8、9煤层下行开采结束后,根据数据分析可知,7、8煤层最大下沉量变化大于9煤层,上覆岩层仍然存在部分裂隙与部分岩层未充分垮落的情况。

2.4 近距离多煤层采后覆岩结构运动演化规律

多煤层下行叠加开采后,覆岩结构类型与覆岩演化规律呈现特定演变过程,主要由“低位砌体梁式结构”,到“联合低位砌体梁结构+高位砌体梁式结构”,再演变为“联合低位悬臂梁结构+高位砌体梁式结构”,最终呈现“低位悬臂梁+高位砌体梁式结构”的演变过程。

整体覆岩破断结构第一阶段如图7所示。由于8、9煤层间距较小,仅为7.6 m,当下行开采9煤层时,原8煤层上方的由两个亚关键层组合而成的“联合低位砌体梁结构”受到二次扰动影响,将铰接失稳转化为“联合低位悬臂梁结构”,其上方高位亚关键层(细砂岩)发生破断并承载其上覆软弱岩层。整体覆岩破断结构第二阶段如图8所示。随着工作面的进一步推进,悬臂梁结构逐渐垮落破坏,与其上方原8煤采后采空区贯通,形成的新采空区与亚关键层(粉砂岩)的软弱岩层进一步弯曲破坏,但并未发生垮落。亚关键层(粉砂岩)与亚关键层(细砂岩)进一步破断形成“低位悬臂梁+高位砌体梁”结构。

由数值模拟试验结果整理得垂直位移对比变化明细表,见表2。为对比分析多煤层采后相关数据变化情况,对相关煤层进行定义。

对覆岩下沉量而言,7、8煤层叠加开采后,7和8煤层的最大下沉量分别为3.1和1.9 m,9煤层未开采无数值;7、8、9煤层叠加开采后,7、8煤层的最大下沉量较7、8煤层叠加开采后均约增大1.4 m,9煤层的下沉量为1.3 m。覆层下沉量增加是因为开采煤层具有一定厚度,为叠加开采后的下沉提供自由空间,但因岩

石碎胀系数的存在,其值始终小于开采煤层厚度,同时说明下位煤层叠加开采使原本未充分垮落的岩体受到进一步的垮落作用。

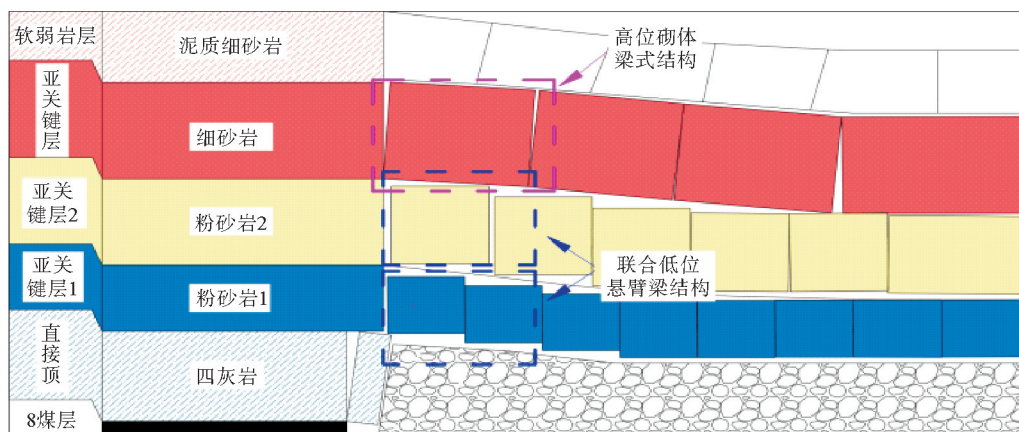


图7 整体覆岩破断结构第一阶段

Fig. 7 The first stage of the whole overlying strata breaking structure

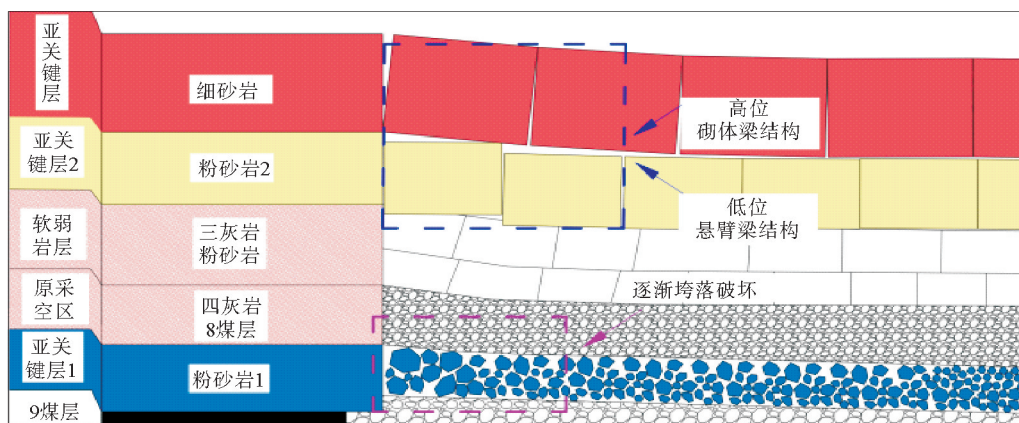


图8 整体覆岩破断结构第二阶段

Fig. 8 The second stage of the whole overlying strata breaking structure

表2 最大下沉量对比分析

Table 2 Comparative analysis of maximum subsidence value			m
煤层	7、8 煤层叠加开采后	7、8、9 煤层叠加开采后	
7 煤层	3.1	4.5	
8 煤层	1.9	3.3	
9 煤层	—	1.3	

3 近距离多煤层采后裂隙带叠加发育特征与综合形态

通过数值模拟软件模拟工作面推进至 40、100、160 及 200 m 时,单一煤层及近距离煤层工作面上方导水裂隙带发育高度变化、发育特征及整体形态演化过程,并得出最终导水裂隙带形态分布特征,为研究近距离多煤层开采时覆岩破坏范围提供参考。

3.1 单一煤层开采数值模拟分析

1) 单一7煤工作面开采裂隙带发育特征

如图9所示,当工作面推进至40 m时,7煤层顶板完全垮落,覆岩上部出现离层裂隙,整体垮落带呈梯形分布。随着推采距离增加,顶板逐渐垮落并充填采空区,裂隙带高度约为8.8 m。推进至100 m时,煤层上方覆岩下沉范围增大,裂隙发育高度增至20.4 m,出现离层裂隙。到160 m时,覆岩破坏加剧,裂隙进一步压实,横向裂隙体积缩小,裂隙带高度增至26.3 m。至200 m时,垮落裂隙区中部形成压实区,横向裂隙基本闭合,裂隙带高度稳定在26.3 m,裂隙区面积达到最大值。

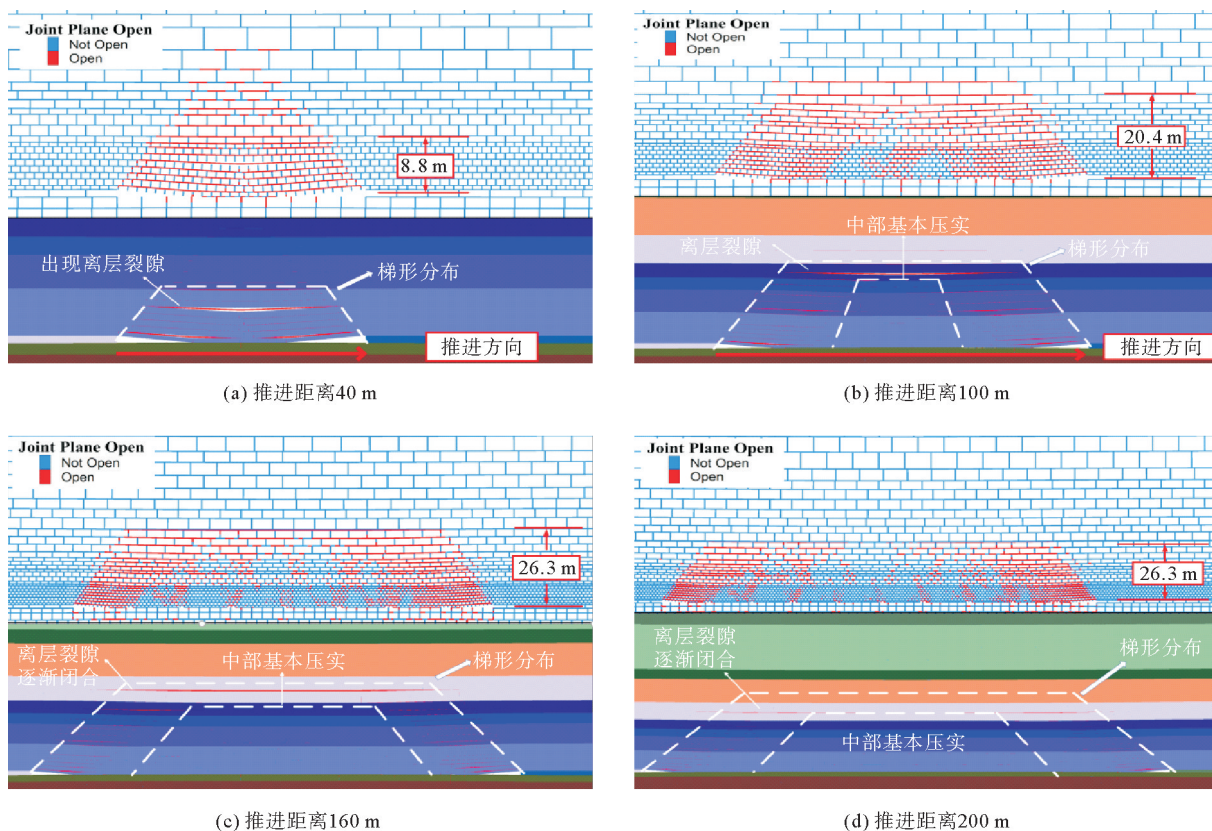


图9 单独开采7煤层裂隙带变化图

Fig. 9 Variations of fracture zone in separate mining coal seam 7

2) 单一8煤工作面开采裂隙带发育特征

如图10所示,当工作面推进至40 m时,8煤层顶板完全垮落,覆岩出现离层裂隙并呈梯形分布。随着推采距离增加,基本顶垮落并充填采空区,裂隙带高度达6.2 m。到100 m时,覆岩下沉范围增大,裂隙发育高度增至25.4 m,出现离层裂隙。推进至160 m时,覆岩充分垮落,离层裂隙压实,裂隙体积缩小,裂隙带高度保持25.4 m。推进至200 m时,压实区形成,横向裂隙闭合,裂隙发育高度稳定,裂隙带面积达到最大值。

3) 单一9煤工作面开采裂隙带发育特征

如图11所示,当工作面推进至40 m时,9煤层直接顶完全垮落,覆岩中上部出现明显离层裂隙,垮落体呈梯形分布,裂隙带发育高度约7.7 m。随着工作面推进至100 m,煤层上方覆岩弯曲下沉范围扩大,亚关键层上方出现离层裂隙,裂隙带高度增至14.7 m。至160 m时,亚关键层下方覆岩破坏并垮落,裂隙带逐渐压实,裂隙闭合,导水裂隙高度增至27.7 m。工作面推进至200 m时,裂隙区中部形成压实区,裂隙高度稳定在27.7 m,裂隙带面积达到最大值。

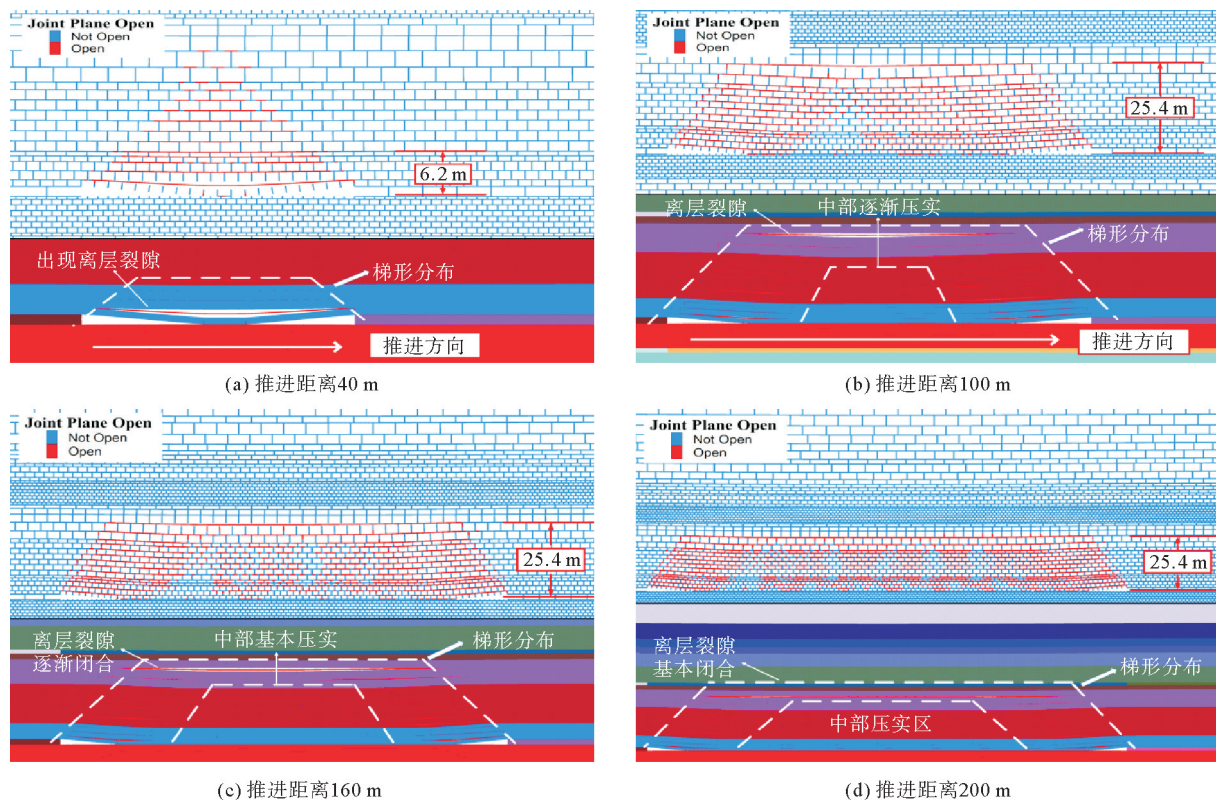


图 10 单独开采 8 煤层裂隙带变化图

Fig. 10 Variations of fracture zone in separate mining coal seam 8

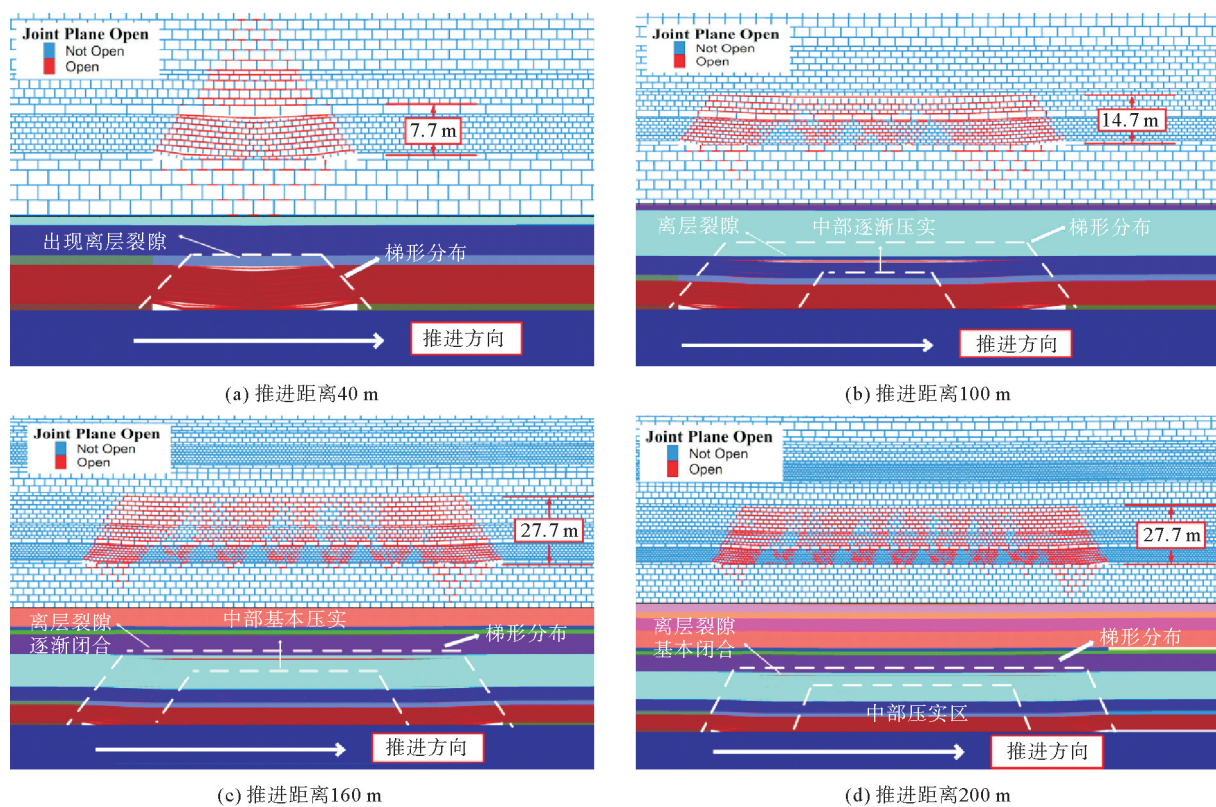


图 11 单独开采 9 煤层裂隙带变化图

Fig. 11 Variations of fracture zone in separate mining coal seam 9

3.2 近距离多煤层采后裂隙带叠加发育特征与综合发育形态

在本研究中,采用下行开采,即先开采7煤层再开采8煤层。如图12所示,8煤层工作面推采初期,8煤层直接顶(四灰)完全垮落破坏,垮落下沉的覆岩中上部出现明显的离层裂隙,整体垮落体呈现梯形分布。且随着推采距离的增加,直接顶也发生跨落,梯形垮落裂隙区上方出现部分横向裂隙离层,覆岩裂隙发育高度约为20.4 m,此时7煤层还未受到8煤层的采动影响,7煤层的裂隙带高度保持在26.3 m,且7煤层的中部区域出现裂隙闭合的现象。随着工作面推进至100 m,煤层覆岩垮落范围逐渐增大,顶板垮落范围越来越大,8煤层上方亚关键层即基本顶(粉砂岩)已经发生破坏下沉,在亚关键层上方出现离层裂隙,垮落覆岩中部开始逐渐压实,但仍然存在一部分微小裂隙;且上覆岩层进一步发育,8煤层裂隙带高度已经与7煤层底板贯通,此时7煤层覆岩在走向方向上自开切眼至100 m处,裂隙二次活化,产生二次发育现象,但原中部压实区右侧已经闭合的裂隙并未受到影响,7煤层裂隙发育高度保持在26.3 m,如图12(a)。当工作面推进至160 m时,8煤层的裂隙带继续与7煤层底板保持贯通状态,裂隙带高度为31.6 m,且此时8煤层裂隙带也呈明显的梯形分布,中部的裂隙有逐渐闭合的现象,7煤层的裂隙二次发育现象在走向上继续扩展,符合越靠近中部,裂隙闭合区越接近三角形的规律,如图12(b)。当工作面继续推进至200 m时,8煤层裂隙带继续保持贯通状态,8煤层上方裂隙带中部产生裂隙闭合区,上方7煤层的裂隙带高度得到进一步发展,发育高度较单一开采时增加了2.4 m,即28.7 m。此时7煤覆岩裂隙带中部出现如图12(c)所示的平行四边形局部裂隙闭合区,这可能是由于随着开采的进推进,覆岩应力分布发生变化,导致裂隙闭合区的形状发生改变。

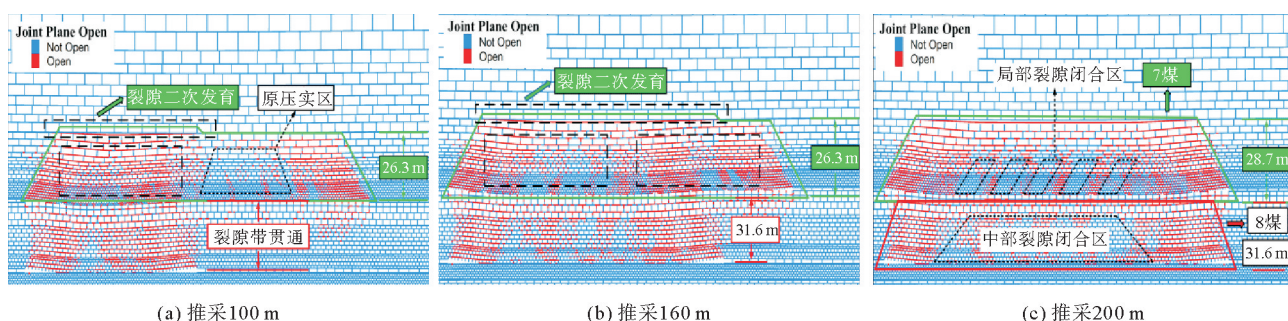


图12 下行开采7、8煤层垂直位移变化云图

Fig. 12 Cloud chart of vertical displacement changes in downward mining coal seams 7, 8

在上位7、8煤层工作面推采结束后,随之进行下位9煤层的开采活动,9煤层工作面推采初期,其直接顶(粉砂岩)完全垮落,垮落下沉的覆岩中上部开始出现明显的离层裂隙,垮落体整体呈梯形分布,且在工作面的推进过程中直接顶发生垮落,此时7、8煤层采后的裂隙带高度分别为28.7和31.6 m。当工作面推进到100 m,8、9两个煤层之间的岩层已全部垮落破坏,9煤层裂隙带完全贯穿8煤层底板并与原8煤上方垮落带连通,7、8、9三煤层的采空区贯通。9煤层上方和8煤层上方分别出现矩形和正三角形的区域,这两部分区域的裂隙呈现正在闭合的趋势。此外,8煤层裂隙带的右侧出现平行四边形裂隙闭合区,如图13(a)。随着9煤层开采推进,8煤层中部出现离层闭和。工作面推进至160 m时,9煤层上方裂隙带形成正梯形和瘦长型平行四边形区域,裂隙基本闭合,裂隙带高度稳定。至200 m时,9煤层中部出现正梯形闭合区,7煤层上方因持续采动形成小平行四边形闭合区,7、8、9煤层及其上覆岩层裂隙贯通,裂隙带高度维持不变。

当9煤层工作面开采到200 m时,由于上方岩层的运动和裂隙的发育,图13(c)所示工作面的高度看起来比图13(a)和图13(b)中低。在9煤层开采过程中,8、9煤层间距右侧的裂隙也在不断发育和变化。当工作面经过此处时,顶板可能会受到裂隙的影响,出现下沉、变形等情况。

对比7、8煤层与7、8、9煤层下行开采后的覆岩垂直位移变化可知,在9煤层开采后,采场中部区域较7、8煤层贯通裂隙更少,即裂隙得到了进一步的压密。9煤层上方梯形中部裂隙闭合区两侧的裂隙数量则明

显增多,裂缝增大,进一步提高了该区域覆岩的导水能力,即裂隙带内非裂隙带压实区的裂隙密集程度明显增加,整体裂隙带发育高度达 67.9 m,如图 13(c)所示。

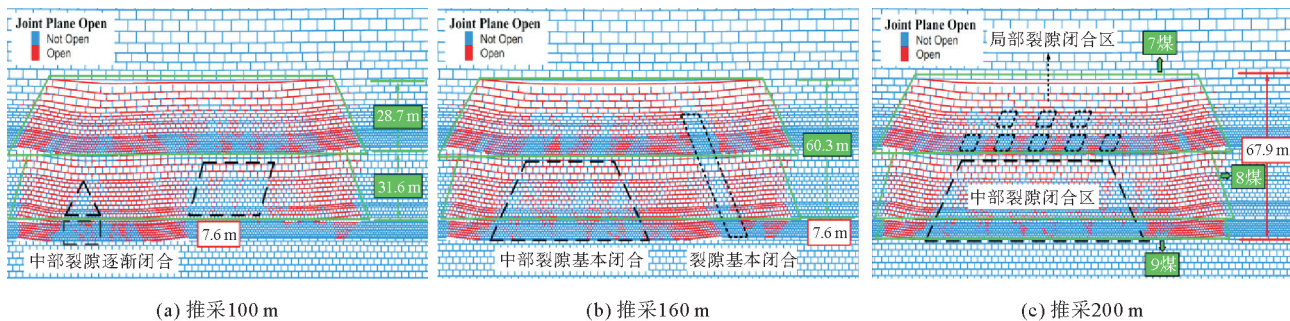


图 13 下行开采 7、8、9 煤层垂直位移变化云图

Fig. 13 Cloud chart of vertical displacement changes in downward mining coal seams 7, 8, 9

3.3 近距离多煤层采后裂隙带发育形态分析

根据理论分析与数值模拟试验,得到裂隙带高度与裂采比分析对比表,如表 3 所示。7、8 煤层叠加开采时,7 煤层的导水裂隙带高度明显增加,其值由单一开采 7 煤时的 26.3 m 增长至 28.7 m,增长值为 2.4 m,裂采比为 20.5,此时 8 煤层的导水裂隙带与 7 煤层采空区贯穿,无法准确得知 8 煤层的导水裂隙带高度,但 7 煤层导水裂隙带的增长是由于 8 煤层的采动导致的,且由于裂隙增长的叠加作用与覆岩的压实作用,可以推测,8 煤层的导水裂隙带高度大于 2.4 m 与单一开采 8 煤时的 25.4 m 之和,即 8 煤层裂采比大于 13.9。7、8、9 煤层叠加开采时,7、8、9 煤层的裂采比与裂隙带高度较 7、8 煤层叠加开采时 7、8、9 煤层的差别不大。此处,由于 9 煤层采后的导水裂隙带发育高度与 8 煤层底板重合,经分析计算可知,9 煤层的导水裂隙带高度大于 28.7 m,裂采比大于 19.8。

表 3 裂隙带高度与裂采比分析对比表

Table 3 Comparative analysis of fracture zone height and fracture-mining ratio

煤层	7、8 煤层叠加开采后		7、8、9 煤层叠加开采后	
	裂隙带高度/m	裂采比	裂隙带高度/m	裂采比
7 煤层	28.7	20.5	28.7	20.5
8 煤层	>27.8	>13.9	>27.8	>13.9
9 煤层	—	—	>28.7	>19.8

4 现场实测与工程验证

为了更好地给煤矿井下现场工程实践提供数据支持,需要对研究结果进行现场验证,以增加相关结论的可靠性。

4.1 观测方案

为获得单一开采 7 煤层与 7、8、9 煤层叠加开采的导水裂隙带发育高度,分别在 9701、9901 工作面设计 2 个仰倾斜钻孔,其中 9701 工作面钻孔观测用来验证 7 煤层采后导水裂隙带发育高度,9901 工作面钻孔观测用来验证多煤层叠加采后 9 煤的导水裂隙带发育高度。1[#]和 2[#]观测钻孔布置在 7 煤层 9701 工作面的运输顺槽中,3[#]和 4[#]钻孔布置在 9 煤层的 9901 工作面的运输顺槽中。钻孔设计参数见表 4,钻孔布置平、剖面示意图见图 14、图 15。采用钻孔双端封堵测漏装置进行现场观测,钻孔角度的设计与裂隙带的走向和倾角相匹配,以提高检测效率和测量精度。同时,考虑现场地质条件,以降低施工难度和风险,避免与周围设

施产生干扰。此外,设计多个钻孔以不同角度进行交叉验证,提高测漏数据的准确性和可靠性。

表 4 钻孔设计参数表

Table 4 Borehole design parameters

孔号	仰角/(°)	方位角/(°)	观测段孔径/mm	孔深/m	孔高/m
1 [#]	40	137	92	60	38.6
2 [#]	45	137	92	60	42.4
3 [#]	68	137	92	90	83.4
4 [#]	75	137	92	90	86.9

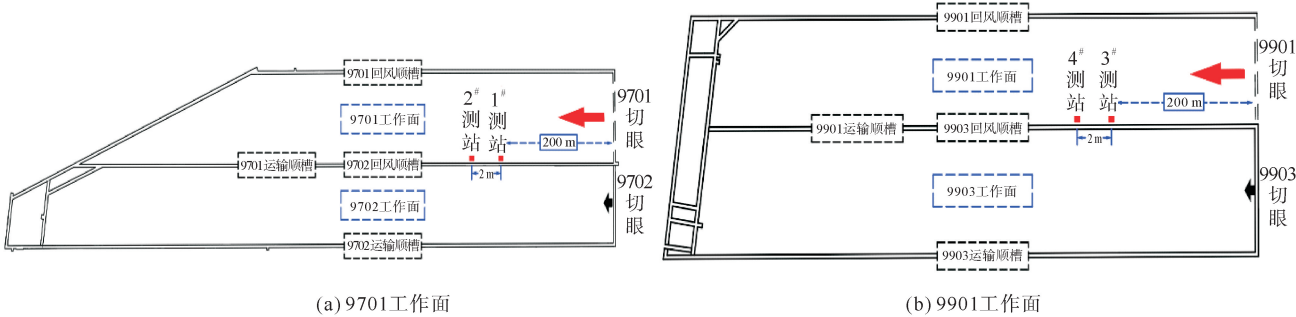


图 14 各工作面钻孔布置平面示意图

Fig. 14 Plane schematic diagram of drilling layout in each working face

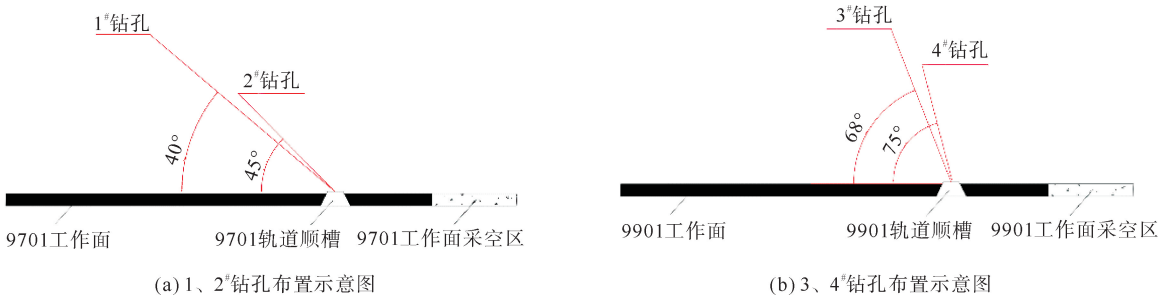


图 15 各工作面钻孔布置剖面示意图

Fig. 15 Sectional schematic diagram of drilling layout section in each working face

4.2 观测成果分析

1[#]、2[#] 钻孔实际施工斜长均为 53.4 m,对应的最大观测高度分别为 34.3 和 37.8 m,1[#]、2[#] 钻孔测得各岩层漏失量数据绘制成的岩层漏失量分布如图 16 所示。根据钻孔由下到上的观测顺序,观测结果可分为三段,如图 16(a)所示,钻孔斜长 9.4~35.8 m 为导水裂隙带段,钻孔漏失量均大于 15 L/min。当观测钻孔观测至 38 m 以后,观测范围进入工作面基岩范围内最高岩层中,此段钻孔漏失量均小于 8 L/min,由此可知,7 煤层工作面开采后覆岩导水裂隙带不会发育至此岩层。1[#] 观测孔导水裂隙带发育高度约为 23 m。经综合分析,导水裂隙带内钻孔的注水漏失量应大于 15 L/min,漏失量小于 8 L/min 基本认为已经处于裂隙带外围位置。2[#] 观测孔导水裂隙带的钻孔漏失量的变化规律与 1[#] 钻孔基本相同。

3[#]、4[#] 钻孔实际施工斜长均为 85.3 m,对应的最大观测高度分别为 79.1 与 82.4 m,3[#]、4[#] 钻孔测得各岩层漏失量数据绘制成的岩层漏失量分布图,如图 17 所示。钻孔内由下到上的观测结果可分为四段。在第一段钻孔区域内,钻孔斜长 3.8~6.1 m,岩层的漏失量为 17.9~18.7 L/min,此段具备较强的导水能力,该

区域开始进入 9 煤采后导水裂隙带高度内。在第二段钻孔区域内, 钻孔斜长 9.4~39.1 m, 漏失量急剧增加至 21.3~26.8 L/min, 该区域岩层裂隙导水贯通能力较好, 该范围属于 8 煤层上方导水裂隙带范畴。当观测至钻孔斜长 42.4 m 时, 漏失量由 25.9 急剧上升到 30.8 L/min, 岩层漏失量显著增加, 此时裂隙带岩层漏失量进入第三阶段, 部分为 7 煤层上方裂隙带范围, 故出现岩层漏失量明显增加的现象。第四阶段, 钻孔斜长在 72.1 m 处, 漏失量由 29.8 降至 6.8 L/min, 此后区域岩层的渗透量小于 8 L/min, 说明此段区域所在岩层所受采动影响范围较小, 基本处于弯曲下沉带范围。4[#] 观测孔导水裂隙带的钻孔漏失量的变化规律与 3[#] 钻孔基本相同。

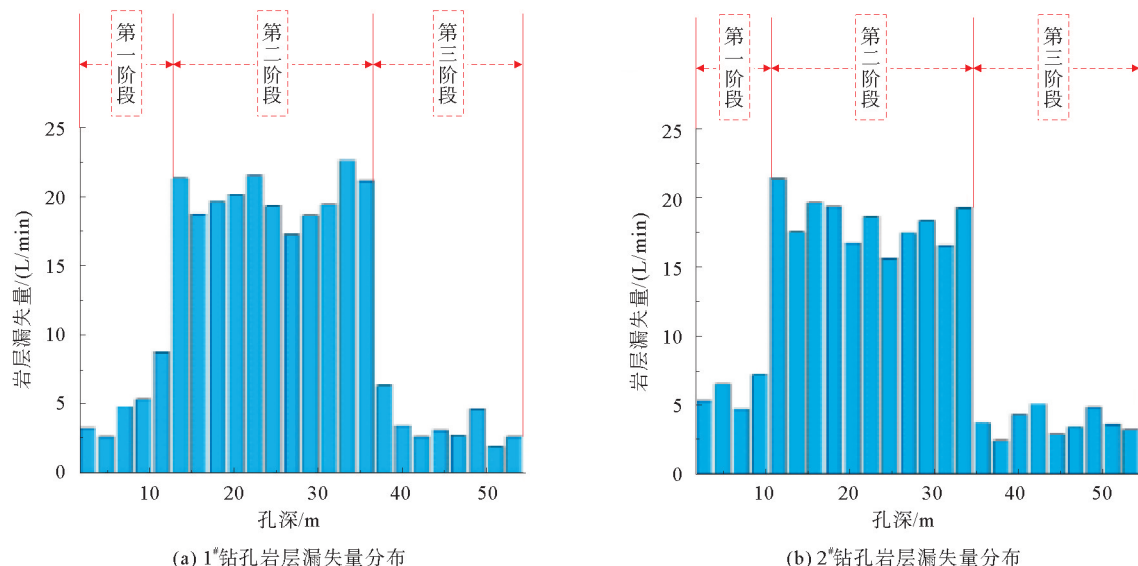


图 16 9701 工作面钻孔探测结果示意图

Fig. 16 Schematic diagram of drilling detection results in 9701 working face

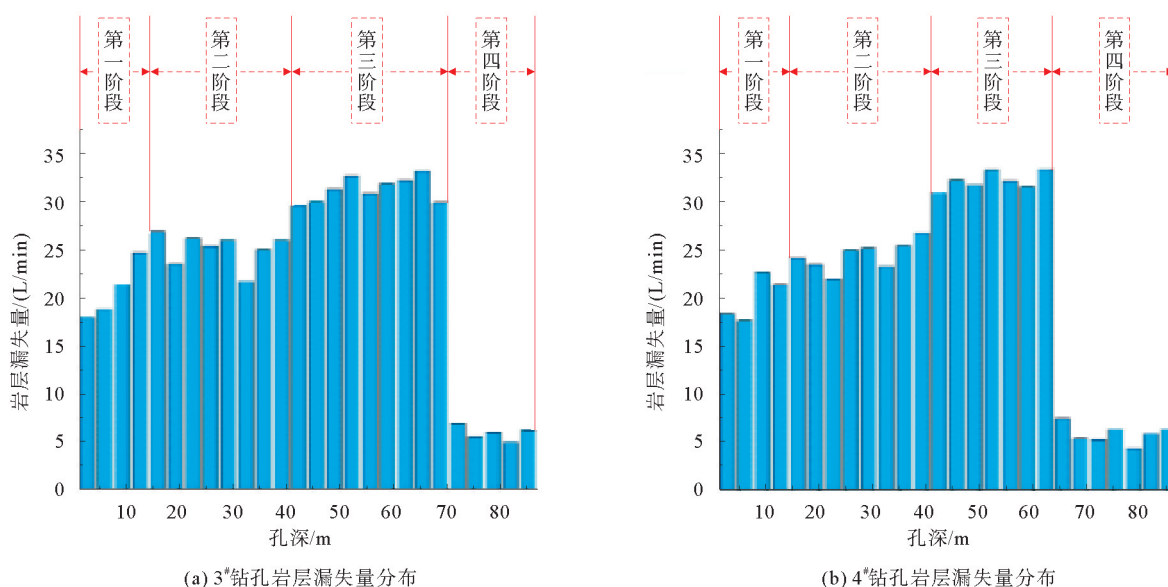


图 17 9901 工作面钻孔探测结果示意图

Fig. 17 Schematic diagram of drilling detection results in 9901 working face

导水裂隙带高度现场实测与数值模拟结果汇总见表 5。与现场实测最大值结果相比, 7 煤上方裂隙带与

整体裂隙带发育高度分别约增加了 9%与 4%。这是由于在数值模拟过程中并未考虑碎胀系数,覆岩垮落空间较大,导致煤层开采完后垮落带和裂隙带范围都有所增加,属于合理范围内。因此,现场实测得到导水裂隙带最大高度所处的岩层位置与数值模拟所得结果对应岩层基本一致。

表 5 现场实测与数值模拟结果汇总表

Table 5 Summary of measured and numerical simulation results

钻孔	现场实测/m	数值模拟/m	钻孔	现场实测/m	数值模拟/m
1 [#]	23.0	26.3	3 [#]	63.8	67.9
2 [#]	23.8		4 [#]	60.1	

5 结论

以白庄煤矿近距离 7、8、9 煤层工作面为研究背景,分析了近距离煤层下行开采后的基本顶破断特征,研究了覆岩叠加运动规律与裂隙带综合发育形态。得到如下主要结论:

1) 近距离煤层下行开采后,上覆岩层呈现由“低位砌体梁式结构”到“联合低位砌体梁结构+高位砌体梁式结构”,再到“联合低位悬臂梁结构+高位砌体梁式结构”,最终至“低位悬臂梁+高位砌体梁式结构”的演变过程。近距离煤层开采过程中覆岩承载结构演变规律表现为:第二层开采后第一层的导水裂隙带高度明显增加,第三层开采后,第一层导水裂隙带高度变化不明显。

2) 通过理论分析与数值模拟的方法,得到了裂隙带高度与裂采比数据,7、8 煤层叠加开采时 7 煤层导水裂隙带高度增长,7、8、9 煤层叠加开采时各煤层裂采比和裂隙带高度与 7、8 煤层叠加开采时差别不大。

3) 近距离煤层下行开采后,梯形裂隙区中部的贯通裂隙明显减少,区域裂隙得到了进一步的压密,两侧区域裂隙数量明显增多,密度增大,进一步提高了该区域覆岩的导水能力。即裂隙带内非裂隙带压实区的裂隙密集程度明显增加,整体裂隙带发育高度增加。

4) 现场实测得到导水裂隙带最大高度所处的岩层位置与数值模拟所得结果对应岩层基本一致,说明结论可靠。

参考文献:

- [1] 秦忠诚,聂旺,刘永乐,等.厚煤层分岔区下分层回采巷道位置选择[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(3):43-49.
QIN Zhongcheng,NIE Wang,LIU Yongle,et al. Location selection of lower layer mining roadway in thick coal seam bifurcation area[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2020,39(3):43-49.
- [2] 张明光.极近距离煤层采空区下巷道支护技术研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(4):35-41.
ZHANG Mingguang. Roadway support technology in goaf of ultra-close distance coal seams[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2018,37(4):35-41.
- [3] 鲁岩,刘长友.近距离煤层同采巷道混合布置参数分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(3):68-77.
LU Yan,LIU Changyou. Mixed layout parameters of simultaneous mining roadways in close multiple-seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2015,34(3):68-77.
- [4] 蒲志强,车明,张磊,等.极近距离采空区下交错开采顶板灾害防治[J].山东科技大学学报(自然科学版),2009,28(4):73-76.
PU Zhiqiang,CHE Ming,ZHANG Lei,et al. Prevention and control of roof disasters in staggered mining under the goaf ultra-close to seam being mined[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2009,28(4):73-76.
- [5] 兰红,郑禄林,荣鹏,等.近距离煤层开采底板应力演化规律及围岩稳定性研究[J].煤炭技术,2023,42(1):6-10.
LAN Hong,ZHENG Lulin,RONG Peng,et al. Study on evolution law of floor stress and stability of surrounding rock in close-distance coal seam mining[J]. Coal Technology,2023,42(1):6-10.

- [6] 张桐桐. 浅埋煤层群下位薄煤层开采覆岩运动规律及矿压控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
ZHANG Tongtong. Research on movement law of overlying rock and mine pressure control technology in lower thin coal seam mining of shallow coal seam group[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [7] 董国伟, 任小亮, 梁烜铭, 等. 极近距离煤层与油页岩复合顶板裂隙发育及瓦斯涌出规律研究[J]. 煤炭科技, 2021, 42(6): 1-6.
DONG Guowei, REN Xiaoliang, LIANG Xuanming, et al. Research on the crack development and gas emission law of the composite roof between coal seam and oil shale in very close distance[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2021, 42(6): 1-6.
- [8] 韩存地, 查大顺, 韩春福, 等. 极近距离煤层覆岩活动规律及支架阻力研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(2): 19-23.
HAN Cundi, ZHA Dashun, HAN Chunfu, et al. Study on overburden strata movement law and support working resistance of extremely close coal seam[J]. Coal Technology, 2023, 42(2): 19-23.
- [9] 卫帅. 上榆泉矿近距离煤层开采覆岩结构演变机理及矿压控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
WEI Shuai. Study on evolution mechanism of overburden structure and ground pressure control in close distance seams mining in Shangyuquan mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [10] 黄庆享, 赵萌烨, 黄克军. 浅埋煤层群开采顶板双关键层结构及支护阻力研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 71-77.
HUANG Qingxiang, ZHAO Mengye, HUANG Kejun. Study of roof double key strata structure and support resistance of shallow coal seams group mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48(1): 71-77.
- [11] 伍永平, 皇甫靖宇, 王红伟, 等. 大倾角走向长壁工作面局部充填无煤柱开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 280-297.
WU Yongping, HUANGFU Jingyu, WANG Hongwei, et al. Theory and technology of partial backfill non-pillar mining in longwall faces of steeply dipping coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 280-297.
- [12] MAJDI A, HASSANI F, NASIRI M. Prediction of the height of distressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 98: 62-72.
- [13] SINGH G S P, SINGH U K. Prediction of caving behavior of strata and optimum rating of hydraulic powered support for longwall workings[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(1): 1-16.
- [14] 魏世荣, 赵延林, 戚春前, 等. 多煤层开采导水裂隙带发育与覆岩破坏高度规律[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(2): 18-26.
WEI Shirong, ZHAO Yanlin, QI Chunqian, et al. On development law of water conducting fracture zone and overburden failure height in multi-coal seam mining[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2022, 37(2): 18-26.
- [15] PALCHIK V. Formation of fractured zones in overburden due to longwall mining[J]. Environmental Geology, 2003, 44(1): 28-38.
- [16] 李树刚, 丁洋, 安朝峰, 等. 近距离煤层重复采动覆岩裂隙形态及其演化规律实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(5): 904-910.
LI Shugang, DING Yang, AN Zhaofeng, et al. Experimental research on the shape and dynamic evolution of repeated mining-induced fractures in short-distance coal seams[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(5): 904-910.

(责任编辑: 吕海亮)